บทที่ 7

อภิปรายและวิเคราะห์ผล

จากบทที่ 5 และบทที่ 6 ที่ได้กล่าวถึงการตอบสนองและความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว ทั้งในกรณีที่ไม่มีมวลหน่วงปรับค่าและมีมวลหน่วงปรับค่า โดยพบว่าภายใต้แผ่นดินไหวขนาดความเร่ง 0.001 และ 0.01 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก การเปลี่ยนตำแหน่งของอาคารตัวอย่างมีค่าน้อย และมีลักษณะของการกำทอนดังรูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนตำแหน่งของชั้น 20 ที่เวลาใดๆ ของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่น SCT-85 และ BYK-95 และเมื่อปรับปรุงอาคารโดยติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่จำลองเป็นชั้นที่ 21 พบว่าสามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งของอาคารตัวอย่างลงได้มาก แสดงในตารางที่ 7.1 ที่ความเร่งแผ่นดินไหว 0.001 และ 0.01 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก ได้ว่าสามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นบนสุดของอาคารได้ถึง 45.1% และ 37.2% ในกรณี SCT-85 และ 37.6% และ 37.5% ในกรณี BYK-95 ที่แผ่นดินไหวขนาดความเร่ง 0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก พบว่าลักษณะการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 เริ่มไม่มีลักษณะของการกำทอน เนื่องจากความเสียหายที่เกิดกับอาคาร ทำให้ความถี่ธรรมชาติของอาคารมีค่าเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามยังพบว่ามวลหน่วงปรับค่าสามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งให้อาคารได้ระดับหนึ่ง โดยกรณี SCT-85 ลดการเปลี่ยนตำแหน่งได้ 18.0% และกรณี BYK-95 ลดได้ 27.1% และที่แผ่นดินไหวขนาดความเร่ง 0.098 และ 0.2 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกพบว่าความเสียหายมีค่ามากขึ้น การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ไม่มีลักษณะการกำทอนเนื่องจากคุณสมบัติของโครงสร้างที่เปลี่ยนไป โดยมวลหน่วงปรับค่าลดการตอบสนองบ้างในกรณี SCT-85 ขนาด 0.098 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก สำหรับกรณีอื่นการมีมวลหน่วงปรับค่ากลับเป็นการเพิ่มการเปลี่ยนตำแหน่งให้กับโครงสร้าง นอกจากนั้นยังเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งถาวรในโครงสร้างขึ้น (Permanent displacement)

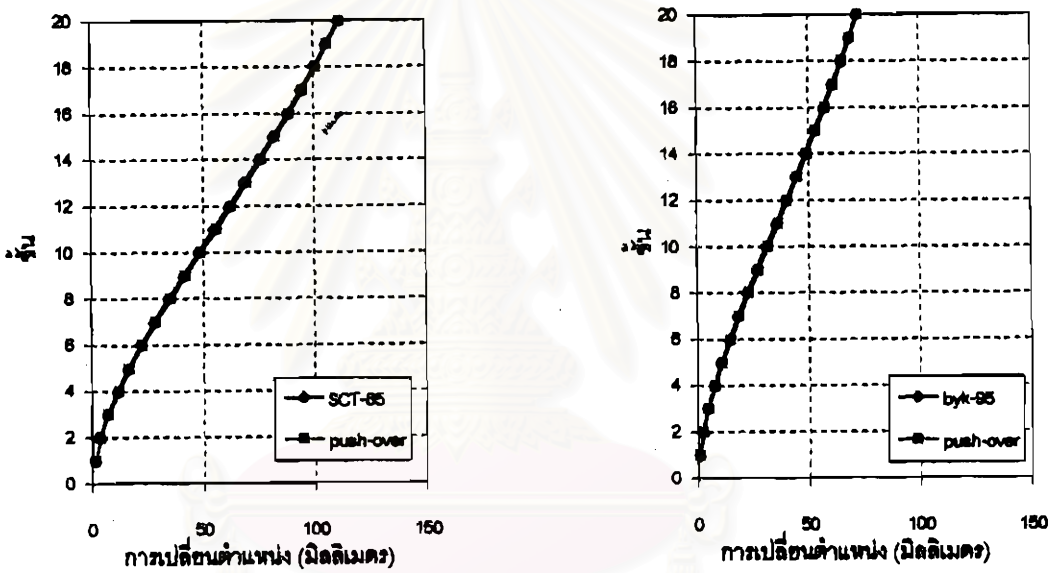
ตารางที่ 7.1 การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง

ความเร่ง, เท่าของแรงโน้มถ่วง	SCT-85			BYK-95		
	การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 (มิลลิเมตร)		ลดการเปลี่ยนตำแหน่งได้	การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 (มิลลิเมตร)		ลดการเปลี่ยนตำแหน่งได้
	ไม่มี TMD	มี TMD	% ของอาคารไม่มี TMD	ไม่มี TMD	มี TMD	% ของอาคารไม่มี TMD
0.001	12.7	7.0	45.1	7.2	4.5	37.6
0.01	111.3	69.9	37.2	72.3	45.1	37.5
0.05	326.0	267.2	18.0	275.0	200.4	27.1
0.098	587.1	543.6	7.4	475.8	480.3	-0.9
0.2	1087.7	1138.4	-4.7	1042.3	1113.0	-6.8

สำหรับบทนี้ จะกล่าวถึงพฤติกรรมและรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้น รวมถึงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่า ในการลดการตอบสนองของอาคารตัวอย่าง ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85 และ BYK-95

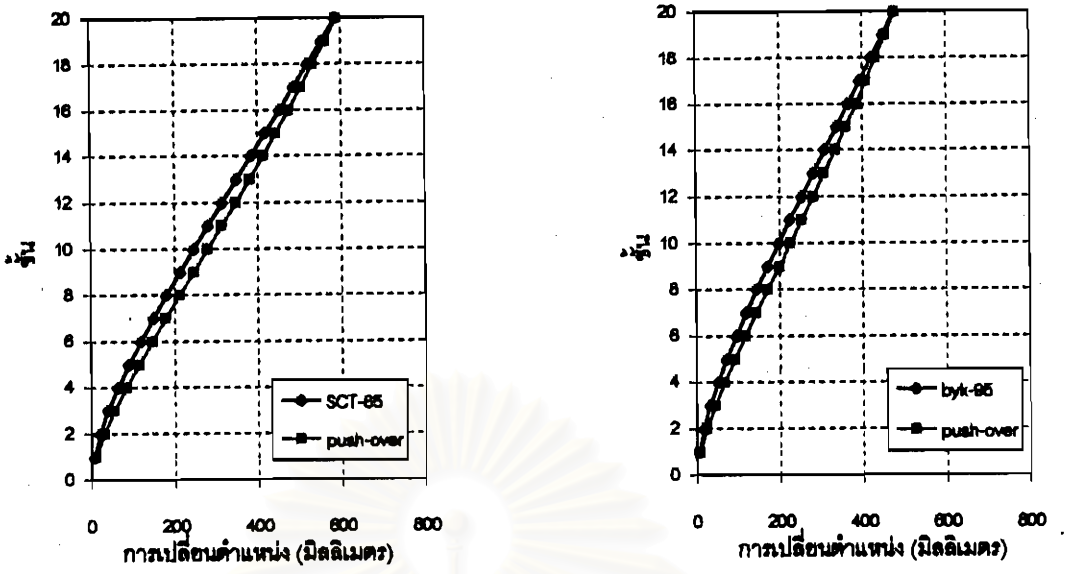
7.1 การวิเคราะห์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวกับการดันด้วยแรงด้านข้างแบบสถิต

แม้ว่าการวิเคราะห์โดยใช้แรงดันด้านข้างแบบสถิตจะใช้แรงด้านข้างกระจายเป็นรูปสามเหลี่ยมหัวกลับ (Inverted triangular) ซึ่งมีสมมติฐานว่าการตอบสนองของอาคารเป็นผลจากการเปลี่ยนตำแหน่งในโหมดที่ 1 เป็นหลัก แต่ก็มีข้อแตกต่างกับการวิเคราะห์ภายใต้แรงแผ่นดินไหว เช่นผลของการเปลี่ยนตำแหน่งแบบกลับไปมา, การเกิดการเสื่อมลดของกำลังและสติฟเนส นอกจากนั้นยังมีผลของการตอบสนองของโหมดที่สูงกว่าอีกด้วย เมื่อกำหนดให้การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่างภายใต้การวิเคราะห์ด้วยแรงด้านข้างดันแบบสถิตมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้นเดียวกันภายใต้การวิเคราะห์ด้วยแรงแผ่นดินไหว พบว่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 7.1 และรูปที่ 7.2 โดยรูปที่ 7.1 แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้นต่างๆ ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.01 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก เปรียบเทียบกับการดันด้วยแรงด้านข้างแบบสถิต และรูปที่ 7.2 เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.1 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก



รูปที่ 7.1 การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นต่างๆ จากการวิเคราะห์ด้วยแรงแผ่นดินไหวขนาด 0.01 เท่า และการวิเคราะห์แบบสถิต

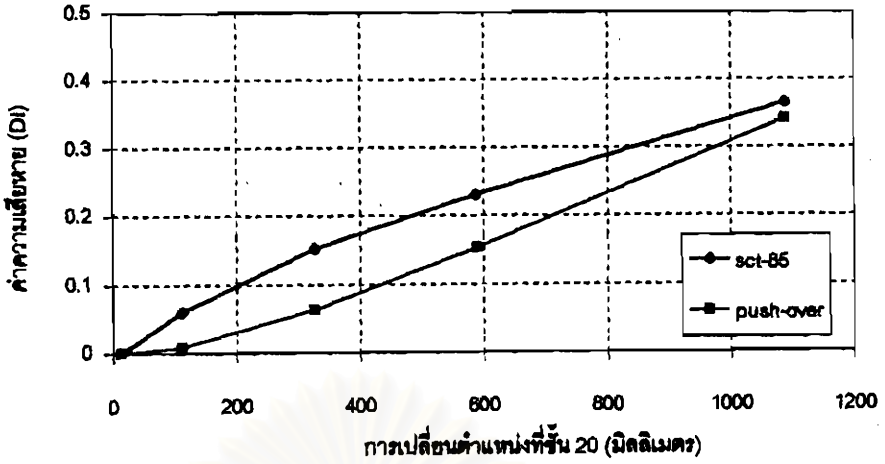
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



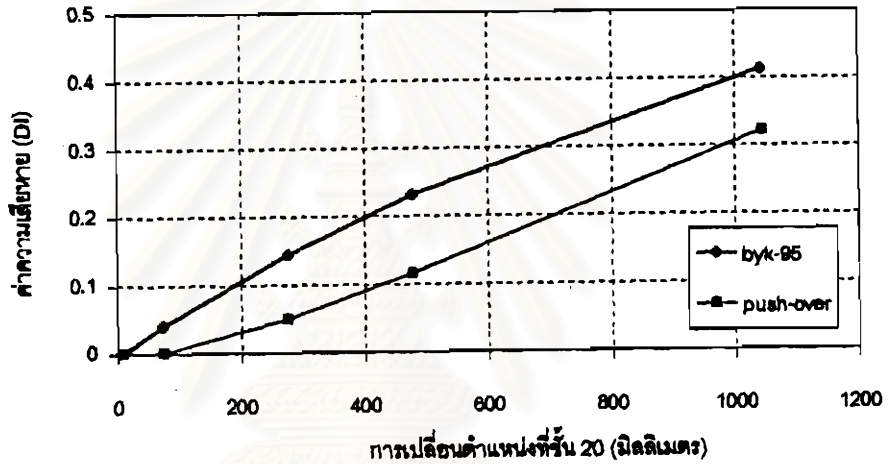
รูปที่ 7.2 การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นต่างๆ จากการวิเคราะห์ด้วยแรงแผ่นดินไหวขนาด 0.1 เท่า และการวิเคราะห์แบบสถิต

จากรูปที่ 7.1 และรูปที่ 7.2 ซึ่งได้กำหนดค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ภายใต้การวิเคราะห์ด้วยแรงดันด้านข้างให้เท่ากับค่าการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้น 20 ภายใต้การวิเคราะห์ด้วยแรงแผ่นดินไหว พบว่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดขึ้นในกรณีแผ่นดินไหวขนาด 0.01 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทั้งสองมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก แต่ที่แผ่นดินไหวขนาด 0.1 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก พบว่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ได้จากการวิเคราะห์ภายใต้แรงแผ่นดินไหว มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปโดยมีพฤติกรรมเป็นแบบดัดมากขึ้น จากการที่อาคารตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งโครงข้อแข็งซึ่งประพฤติตัวเป็นแบบการเฉือน (Shear mode) และผนังที่เป็นแบบการดัด (Bending mode) และจากบทที่ 5 พบว่าภายใต้แผ่นดินไหว ประสิทธิภาพของโครงข้อแข็งในการยึดรั้งการเปลี่ยนตำแหน่งจะต่ำลงเมื่อแผ่นดินไหวมีขนาดแรงขึ้น เนื่องมาจากความเสียหายที่เกิดมากในชิ้นส่วนคาน เป็นผลให้พฤติกรรมของอาคารเปลี่ยนแปลงไป โดยมีพฤติกรรมเป็นแบบการดัดมากขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงดันด้านข้างแบบสถิต ที่ได้ค่าความเสียหายที่ต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 7.3 ทำให้พฤติกรรมแบบเฉือนของอาคารตัวอย่างมีผลที่มากกว่าอาคารภายใต้แผ่นดินไหว รูปแบบการเปลี่ยนตำแหน่งจึงแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.2

รูปที่ 7.3 และรูปที่ 7.4 เป็นค่าความเสียหายที่การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาดต่างๆ ทั้งจากคลื่น SCT-85 และคลื่น BYK-95 เปรียบเทียบกับค่าความเสียหายที่ได้จากการดันด้วยแรงด้านข้างแบบสถิตที่การเปลี่ยนตำแหน่งชั้น 20 ค่าเดียวกัน



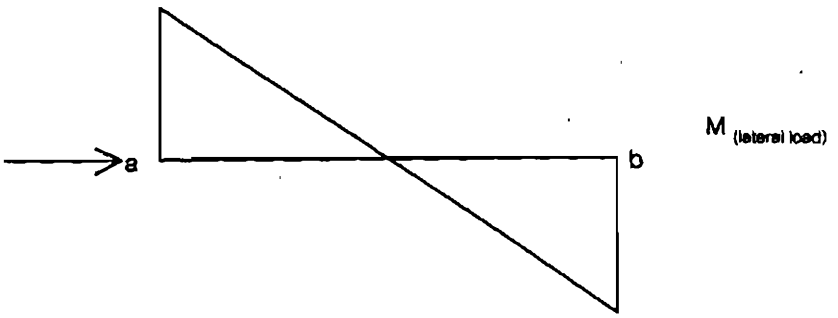
รูปที่ 7.3 ค่าความเสียหายที่การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85



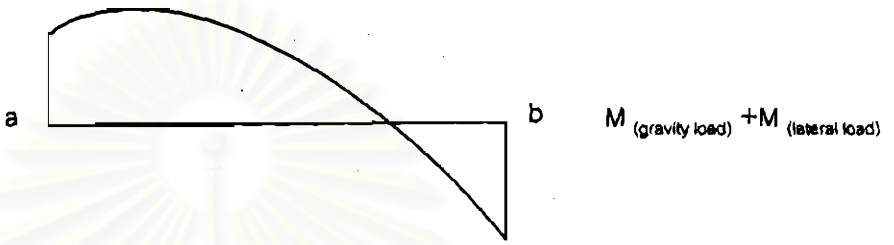
รูปที่ 7.4 ค่าความเสียหายที่การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว BYK-95

จากรูปที่ 7.3 และรูปที่ 7.4 พบว่าค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวมีค่ามากกว่าค่าความเสียหายที่ได้จากการดันด้วยแรงด้านข้างแบบสถิต เนื่องจากการเกิดการเคลื่อนที่แบบสลับทิศนั่นเองทำให้เกิดความเสียหายในชิ้นส่วนโดยตลอด

(ก) โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร



(ข) โมเมนต์เนื่องจากแรงกระทำด้านข้าง



(ค) โมเมนต์เนื่องจากผลรวมของน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรกับแรงด้านข้าง

รูปที่ 7.5 การกระจายโมเมนต์ในชิ้นส่วน

รูปที่ 7.5 แสดงการกระจายโมเมนต์ที่เกิดในชิ้นส่วน สำหรับอาคารตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ออกแบบเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจรและแรงลม แต่อย่างไรก็ตามค่าแรงลมที่ได้ค่อนข้างต่ำ โมเมนต์ที่ใช้ในการออกแบบจึงถูกควบคุมโดยโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรเป็นหลัก ซึ่งสามารถเขียนการกระจายโมเมนต์ได้ดังรูปที่ 7.5(ก) โดยที่ปลายทั้งสองด้านถูกออกแบบรับโมเมนต์ลบและโมเมนต์บวกซึ่งได้ค่าที่น้อยกว่า และออกแบบรับโมเมนต์บวกบริเวณกลางชิ้นส่วน ในกรณีมีแรงด้านข้างกระทำโมเมนต์จะมีการกระจายเปลี่ยนไป แสดงในรูปที่ 7.5(ข) จากทิศการกระทำของแรงด้านข้างในรูป จะได้ว่าที่ขอบ a โมเมนต์จะมีทิศเป็นบวก และที่ขอบ b โมเมนต์มีทิศเป็นลบ เมื่อรวมผลของน้ำหนักจากในรูป 7.5(ก) และรูปที่ 7.5(ข) จะได้ว่าโมเมนต์ที่เกิดมีการกระจายดังรูปที่ 7.5(ค) เนื่องจากโมเมนต์ที่เกิดจากแรงด้านข้างมีค่าสูงกว่าโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร จึงได้ว่าที่ขอบ a โมเมนต์จะมีทิศเป็นบวก และที่ขอบ b โมเมนต์มีทิศเป็นลบเนื่องจากโมเมนต์ที่เกิดมีลักษณะที่เสริมกัน จากการที่ขอบ a ได้โมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีทิศเป็นบวก แต่ในการออกแบบอาคารตัวอย่าง โมเมนต์บวกที่ออกแบบมีค่าไม่สูงมากนัก ที่ขอบ a จึงเกิดความเสียหายขึ้นก่อนและมีค่าสูงเมื่อเทียบกับขอบ b ซึ่งออกแบบรับโมเมนต์ลบ ในกรณีแผ่นดินไหวแรงที่กระทำมีลักษณะเป็นวัฏจักร ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นที่ขอบทั้งสองข้าง ความเสียหายที่เกิดขึ้นจึงมีค่าสูงกว่าความเสียหายที่เกิดจากแรงกระทำด้านข้างแบบสถิต ดังแสดงในรูปที่ 7.3 และรูปที่ 7.4

นอกจากนั้นจากลักษณะของแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร ยังทำให้เกิดความเสียหายสะสมเนื่องจากการสลายพลังงานของชิ้นส่วนโดยการเกิดการครากด้วย จึงทำให้ค่าความเสียหายที่ได้มีค่ามากกว่าการดันด้วยแรงด้านข้างแบบสถิต

7.2 การเปลี่ยนตำแหน่งของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว

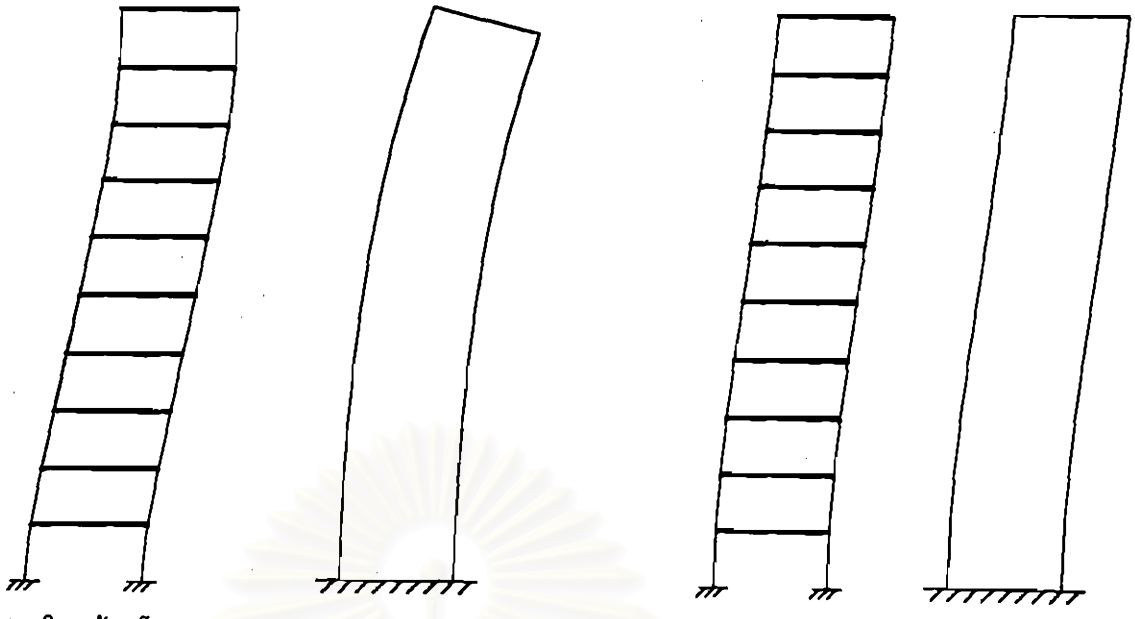
จากการวิเคราะห์ข้างต้นได้ว่าความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างที่ใช้มีค่าประมาณ 0.46 เฮิรซ์ท และความถี่เด่นชัด (Predominant frequency) ของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ ได้แก่คลื่น SCT-85 มีค่าเท่ากับ 0.49 เฮิรซ์ท และคลื่น BYK-95 เท่ากับ 0.44 เฮิรซ์ท ซึ่งเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่าง และภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวดังกล่าวทำให้เกิดการกำทอนขึ้น ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ภายใต้คลื่น SCT-85 และ BYK-95 ขนาดความเร่ง 0.001 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ที่ความเร่งดังกล่าวอาคารตัวอย่างมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic) ไม่มีความเสียหายใดๆ เกิดขึ้น ทำให้ความถี่ธรรมชาติของอาคารมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง จึงเกิดการกำทอนขึ้น ที่ความเร่ง 0.01 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ก็เช่นกัน การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 เป็นรูปแบบของการกำทอนอยู่ ถึงแม้ว่าโครงสร้างจะเริ่มมีความเสียหายแล้วก็ตาม แต่ก็เป็นเฉพาะการแตกร้าวเท่านั้น คุณสมบัติทางด้านพลวัตของอาคารจึงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

สำหรับอาคารตัวอย่างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า พบว่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 มีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าค่อนข้างมาก ดังแสดงในรูปที่ 6.1 แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งของอาคารตัวอย่างในกรณีไม่มีและมีมวลหน่วงปรับค่า ภายใต้คลื่น SCT-85 และ BYK-95 เห็นได้ว่ามวลหน่วงปรับค่าสามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งของชั้นดังกล่าวได้ค่อนข้างมาก

ที่แผ่นดินไหวขนาดความเร่ง 0.05 เท่าของเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกพบว่าลักษณะการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 เริ่มสูญเสียรูปแบบของการกำทอน เนื่องจากภายใต้แผ่นดินไหวขนาดดังกล่าว อาคารตัวอย่างเกิดความเสียหายมากขึ้น โครงสร้างเริ่มมีพฤติกรรมเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) ซึ่งทำให้คุณสมบัติด้านพลวัตของอาคารมีค่าเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปรับปรุงอาคารดังกล่าวโดยการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ก็พบว่ายังสามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งได้ดี

ที่แผ่นดินไหวขนาด 0.098 และ 0.2 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกพบว่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 สูญเสียรูปแบบการกำทอนอย่างมาก นอกจากนั้นยังมีการเปลี่ยนตำแหน่งถาวรขึ้นเนื่องจากการที่อาคารเกิดความเสียหายมากนั่นเอง สำหรับการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไป ก็ไม่ช่วยให้การเปลี่ยนตำแหน่งมีค่าลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) โครงข้อแข็ง (ข) ผนัง (ค) โครงข้อแข็งกับผนัง

รูปที่ 7.6 พฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของโครงข้อแข็งกับผนัง

รูปที่ 7.6 แสดงพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของโครงข้อแข็ง, ผนัง และโครงข้อแข็งร่วมกับผนัง เห็นได้ว่าเมื่อโครงข้อแข็งต้านทานแรงด้านข้าง พฤติกรรมจะเป็นแบบเฉือน (Shear mode) การเปลี่ยนตำแหน่งเป็นลักษณะดังรูป และผนังจะมีพฤติกรรมเป็นแบบดัด (Bending mode) ดังนั้นเมื่อโครงข้อแข็งทำงานร่วมกับผนัง จะทำให้การเปลี่ยนตำแหน่งมีลักษณะของการเปลี่ยนตำแหน่งแบบเฉือนและแบบดัดร่วมกัน คือผนังจะยึดรั้งการเปลี่ยนตำแหน่งในบริเวณชั้นล่างๆ และโครงข้อแข็งจะยึดรั้งการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นบน ดังรูปที่ 7.6(ค)

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งและการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดที่ชั้นต่างๆ ภายใต้การกระทำของแผ่นดินไหว พบว่าที่แผ่นดินไหวขนาด 0.001 และ 0.01 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก พฤติกรรมเป็นไปในลักษณะเดียวกับที่แสดงในรูป 7.6(ค) คือเป็นการทำงานร่วมกันของโครงข้อแข็งและผนังนั่นเอง ในชั้นล่างที่ผนังทำหน้าที่ยึดรั้งการเปลี่ยนตำแหน่ง พบว่าได้ค่าที่น้อยมากเนื่องจากสติฟเนส (Stiffness) ของผนังที่มีค่ามาก และที่ชั้นบนการยึดรั้งเป็นหน้าที่ของโครงข้อแข็ง ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งจึงมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับบริเวณชั้นกลาง โดยมีค่าการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดที่ชั้น 11 และเมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่อาคารได้ว่าค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นต่างๆ มีค่าลดลง

ที่แผ่นดินไหวขนาด 0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก การกระจายการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นต่างๆ มีลักษณะเช่นเดียวกับ 2 กรณีแรก และมีค่าการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดที่ชั้น 11 เช่นกัน และการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าก็ยังช่วยในการลดการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นต่างๆ ของอาคาร

ที่แผ่นดินไหวขนาด 0.098 และ 0.2 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกพบว่าการกระจายการเปลี่ยนตำแหน่งมีค่าไม่เหมือนกรณีที่ผ่านมา จากการที่ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์มีค่ามากที่ชั้น 11 และลดลงที่ชั้นสูงขึ้น กลับพบว่าภายใต้แผ่นดินไหวนี้ การเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ที่ชั้นสูงมีค่าไม่ลดลง นอกจากนั้นชั้นที่มีค่าการ

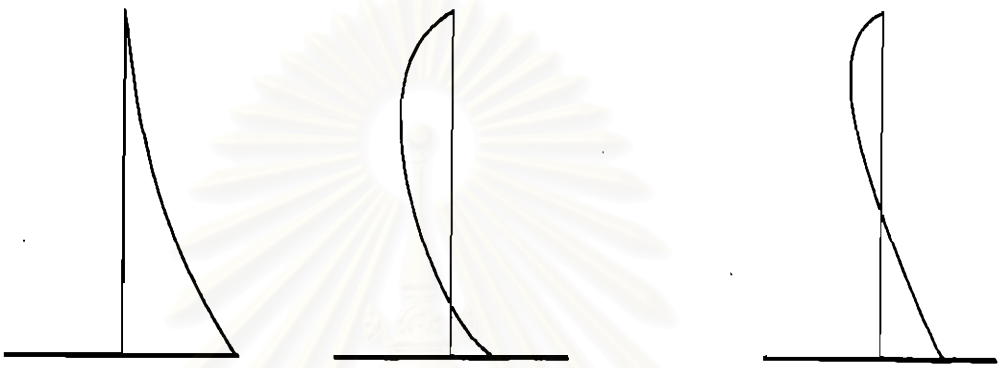
เปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์มากสุดยังเลื่อนไปสู่ชั้นที่สูงขึ้น ลักษณะที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ที่มากบริเวณชั้นดังกล่าวทำให้คานซึ่งมีกำลังต้านทานต่ำกว่าเสาและผนังเกิดความเสียหายขึ้น และกระจายสู่ชั้นบนและชั้นล่างตามลักษณะของการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชั้น เมื่อความเสียหายเกิดมากขึ้นการยึดรั้งการเปลี่ยนตำแหน่งมีค่าลดลง การเปลี่ยนตำแหน่งจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นและตำแหน่งของชั้นที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์สูงสุดเลื่อนไปชั้นที่สูงกว่า สำหรับชั้นล่างของอาคารการยึดรั้งการเปลี่ยนตำแหน่งเกิดจากผนังซึ่งมีสติฟเนสสูง จึงทำให้การเปลี่ยนตำแหน่งมีค่าน้อย และเมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าให้กับอาคารดังกล่าวพบว่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นต่างๆ มีลักษณะเช่นเดียวกับอาคารตัวอย่างที่ไม่มีมวลหน่วงปรับค่า และในกรณีของ BYK-95 การมีมวลหน่วงปรับค่ากลับทำให้การเปลี่ยนตำแหน่งมีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย

7.3 รูปแบบความเสียหายและค่าความเสียหายของอาคารภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว

ในการศึกษาแบ่งความเสียหายออกเป็น 2 ส่วน คือความเสียหายของชิ้นส่วนแนวราบ ได้แก่ชิ้นส่วนคาน และความเสียหายของชิ้นส่วนแนวดิ่ง ได้แก่เสาและผนัง โดยที่ความเสียหายที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนดังกล่าวมีลักษณะการกระจายที่แตกต่างกัน ดังจะได้กล่าวต่อไป

จากการศึกษาพบว่า ความเสียหายในคานจะเริ่มที่คานบริเวณชั้นกลางๆ (ชั้น 8-11) ก่อน หลังจากนั้นความเสียหายค่อยกระจายไปสู่คานชั้นบนและล่าง โดยที่คานในชั้นล่างเกิดความเสียหายน้อยมาก การกระจายความเสียหายในคานที่ชั้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 6.13 และเมื่อแผ่นดินไหวมีขนาดใหญ่ขึ้น คานในชั้นบนจะมีความเสียหายเพิ่มมากขึ้น แต่ในชั้นล่างความเสียหายของคานแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย เมื่อพิจารณาพฤติกรรมในการต้านทานแรงด้านข้างของโครงข้อแข็งจะได้ว่า โครงข้อแข็งจะช่วยยึดรั้งการเปลี่ยนตำแหน่งที่บริเวณชั้นบนของอาคาร ในกรณีแผ่นดินไหวขนาดไม่แรงนัก (0.001 และ 0.01 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก) กำลังของโครงข้อแข็งยังเพียงพอที่จะต้านทานแรงดังกล่าวได้ แต่เมื่อขนาดแผ่นดินไหวแรงขึ้น กำลังต้านทานในคานซึ่งมีค่าต่ำกว่าเสา ไม่เพียงพอที่จะต้านทานแรงด้านข้างดังกล่าวได้ จึงเริ่มเกิดความเสียหาย ซึ่งพิจารณาได้จากการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่มีค่ามากที่ชั้นกลางๆ ของอาคารตัวอย่าง ดังนั้นความเสียหายในคานจึงเริ่มเกิดที่ชั้นกลางของอาคารตัวอย่างเช่นกัน และที่แผ่นดินไหวขนาดแรง (0.098 และ 0.2 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก) เนื่องจากคานในชั้นกลางๆ เกิดความเสียหาย ทำให้การยึดรั้งการเปลี่ยนตำแหน่งลดลง พฤติกรรมของโครงสร้างที่มีลักษณะของการเฉือนเนื่องจากโครงข้อแข็งและการดัดเนื่องจากผนังร่วมกัน เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการยึดรั้งที่ลดลงของโครงข้อแข็ง ทำให้โครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบดัดมากขึ้น การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นบนจึงเพิ่มสูงขึ้น และชั้นที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์สูงสุดเลื่อนไปสู่ชั้นที่สูงกว่า ดังนั้นคานจึงมีความเสียหายเพิ่มมากขึ้นโดยคานที่ชั้นสูงจะมีค่าความเสียหายมากกว่าคานชั้นล่าง เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมเป็นแบบดัดจะมีค่ามากที่ชั้นสูงๆ นั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับค่าการเปลี่ยนตำแหน่งและการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุด ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 และบทที่ 6 สำหรับคานชั้นล่าง (ชั้น 1-4)ค่าความเสียหายที่เกิดน้อยมาก เนื่องจากแรงภายในที่เกิดขึ้นจากแรงด้านข้างเกือบทั้งหมด จะถูกต้านทานโดยผนัง ทำให้คานแทบไม่ต้องออกแรงต้านทานใดๆ เลย ความเสียหายจึงมีค่าน้อย

สำหรับความเสียหายในเสาและผนังสามารถพิจารณาได้จากค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้น จากลักษณะการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นต่างๆของอาคาร รูปที่ 7.6 สามารถเขียนการกระจายโมเมนต์ได้ดังรูปที่ 7.7 โดยที่รูป 7.7(ก) เป็นโมเมนต์ที่เกิดในผนัง รูปที่ 7.7(ข) เป็นโมเมนต์ที่เกิดในโครงข้อแข็ง และรูปที่ 7.7(ค) เป็นโมเมนต์ที่เกิดในโครงสร้างที่เป็นโครงข้อแข็งกับผนังร่วมกัน จากรูปในกรณีผนังอย่างเดียวพบว่าค่าโมเมนต์จะมากที่ชั้นล่าง และมีค่าลดลงตามความสูง การกระจายโมเมนต์เช่นนี้เป็นลักษณะเดียวกับการกระจายโมเมนต์ของคานยื่น (Cantilever beam) นั่นเอง สำหรับกรณีโครงข้อแข็งพบว่าโมเมนต์มีค่าน้อยที่ชั้นล่างและมีทิศทางตรงข้ามกับโมเมนต์ในชั้นบนที่มีค่ามากกว่า ดังนั้นเมื่อโครงสร้างเป็นแบบโครงข้อแข็งและผนังทำงานร่วมกัน โมเมนต์ที่เกิดขึ้นก็จะเป็นลักษณะร่วมกันของโมเมนต์ดังกล่าว ดังรูปที่ 7.7(ค)



(ก) โมเมนต์ในผนัง (ข) โมเมนต์ในโครงข้อแข็ง (ค) โมเมนต์ในโครงข้อแข็งร่วมกับผนัง

รูปที่ 7.7 การกระจายโมเมนต์ในชิ้นส่วนแนวดิ่ง

จากการที่การกระจายค่าโมเมนต์เป็นดังที่ได้กล่าวข้างต้น คือมีค่ามากในบริเวณชั้นล่างและมีค่าเพิ่มขึ้นในชั้นบน เนื่องจากการทำงานร่วมกันของโครงข้อแข็งกับผนัง เมื่อพิจารณาค่าความเสียหายของชิ้นส่วนแนวดิ่ง พบว่าสอดคล้องกับค่าโมเมนต์ดังกล่าวคือ ความเสียหายเกิดมากที่ชั้นล่างโดยเฉพาะชั้น 1 และ 2 โดยเป็นความเสียหายในผนังเป็นหลัก และความเสียหายมีค่าเพิ่มมากขึ้นที่ด้านบนของอาคาร เนื่องจากการครากที่มากในเสา โดยเฉพาะในช่วงชั้น 16-20 ที่มีการลดขนาดหน้าตัดของเสา

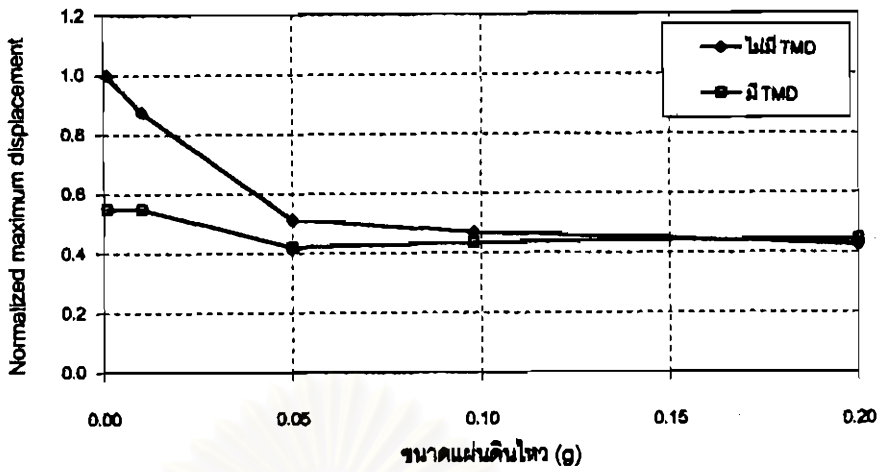
ในกรณีอาคารตัวอย่างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า พบว่าที่แผ่นดินไหวขนาดไม่รุนแรงนัก (0.01 และ 0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก) มวลหน่วงปรับค่าสามารถลดความเสียหายได้ดีระดับหนึ่งทั้งในชิ้นส่วนคาน, เสา และผนัง แต่อย่างไรก็ตามที่ความเร่ง 0.01 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ความเสียหายที่เกิดขึ้นในกรณีอาคารไม่มีมวลหน่วงปรับค่ามีค่าน้อยมาก การที่จะติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดความเสียหายดังกล่าว จึงดูไม่ค่อยมีประโยชน์เท่าไรนัก แต่ถ้ามองในแง่ของการลดการตอบสนอง ก็ถือว่ามวลหน่วงปรับค่าสามารถลดค่าได้ดี ที่แผ่นดินไหวขนาด 0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก พบว่ามวลหน่วงปรับค่าสามารถลดความเสียหายได้ค่อนข้างดี เช่นกรณีแผ่นดินไหว BYK-95 พบว่าสามารถลดความเสียหายในคานจาก 0.15 ให้เหลือประมาณ 0.10 ลดความเสียหายได้ 33% และลดความเสียหายในชิ้นส่วนแนวดิ่งจาก 0.20 ให้เหลือ 0.10 ลดความเสียหายได้ถึง 50% ถึงแม้ความเสียหายระดับนี้ไม่ถึงกับว่าทำให้โครงสร้างพังทลายก็ตาม แต่เมื่อมองที่รูปแบบความเสียหายของชิ้นส่วนพบว่าสามารถลดการครากในคานลงได้เป็นอันมาก ทำให้โครงข้อแข็งสามารถยืดรั้งการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นบนได้

ที่แผ่นดินไหวขนาดรุนแรง (0.098 และ 0.20 เท่าของขนาดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก) มวลหน่วงปรับค่าแทบไม่มีผลใดๆ ในการลดความเสียหายเลย และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดก็พบว่ามีค่าไม่ลดลง และในบางกรณีกลับมีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่ากรณีไม่มีมวลหน่วงปรับค่า ซึ่งเป็นผลให้ความเสียหายมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

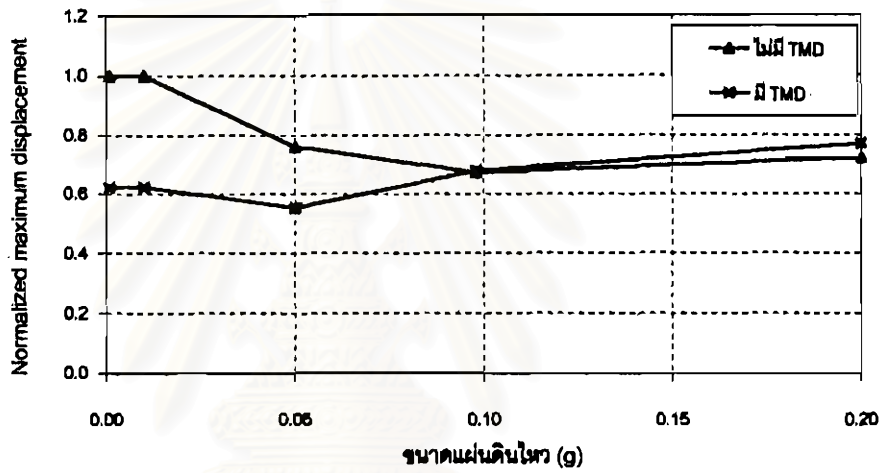
7.4 ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการตอบสนองของอาคาร

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า มวลหน่วงปรับค่าสามารถลดการตอบสนองของอาคารทั้งในด้านการเปลี่ยนตำแหน่ง, การเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ และความเสียหายของอาคารตัวอย่างได้ดีในกรณีแผ่นดินไหวขนาดไม่รุนแรงมากเท่านั้น (0.001, 0.01 และ 0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก) แต่สำหรับแผ่นดินไหวขนาดรุนแรง (0.098 และ 0.2 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก) มวลหน่วงปรับค่าแทบไม่มีผลในการลดการตอบสนองดังกล่าวเลย อีกทั้งยังอาจเป็นการเพิ่มค่าการตอบสนองให้กับอาคารอีกด้วย แสดงในรูปที่ 6.1 เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่น SCT-85 และ BYK-95 ขนาด 0.001 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งเห็นได้ว่าการเปลี่ยนตำแหน่งในกรณีอาคารติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ามีค่าน้อยกว่ากรณีไม่มีมวลหน่วงปรับค่ามากอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดแสดงในรูปที่ 6.2 และรูปที่ 6.3 ซึ่งเห็นได้ว่าอาคารที่มีมวลหน่วงปรับค่าได้ค่าที่ต่ำกว่า นั่นก็คือการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าไว้ สามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งให้กับอาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหวดังกล่าวได้ดี ลักษณะดังกล่าวยังเกิดในกรณีแผ่นดินไหวขนาด 0.01 และ 0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเช่นกันคือสามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งได้ แต่ที่ขนาดความเร่ง 0.05 พบว่าการลดการเปลี่ยนตำแหน่งของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับอาคารที่ไม่มีมวลหน่วงปรับค่า ดังรูปที่ 6.5 เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ภายใต้ SCT-85 และ BYK-95 และรูปที่ 6.6 เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้นต่างๆ ภายใต้คลื่น SCT-85 ขนาด 0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก นั่นก็คือประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการเปลี่ยนตำแหน่งเริ่มมีค่าลดลง และที่ขนาดความเร่งของแผ่นดินไหวเพิ่มขึ้นพบว่าการเปลี่ยนตำแหน่งในกรณีมีมวลหน่วงปรับค่ามีค่าแทบไม่แตกต่างกับกรณีไม่มีมวลหน่วงปรับค่า มวลหน่วงปรับค่าไม่มีผลในการลดการเปลี่ยนตำแหน่งเลย

รูปที่ 7.8 แสดงอัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่เกิดขึ้นในอาคารตัวอย่างกับการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีอาคารมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่นภายใต้แผ่นดินไหวเดียวกันที่ขนาดแผ่นดินไหวต่างๆ กัน จะเห็นได้ว่าเมื่อแผ่นดินไหวมีความแรงมากขึ้น อัตราส่วนดังกล่าวของกรณีไม่มีและมีมวลหน่วงปรับค่าจะลู่เข้าหากัน นั่นก็คือที่แผ่นดินไหวขนาดรุนแรง มวลหน่วงปรับค่าไม่ทำให้การเปลี่ยนตำแหน่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีไม่มีมวลหน่วงปรับค่า จึงไม่ช่วยในการลดการตอบสนองของอาคารตัวอย่างดังกล่าว และรูปที่ 7.9 แสดงอัตราส่วนของค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของการเปลี่ยนตำแหน่งในอาคารตัวอย่างกับการเปลี่ยนตำแหน่งของอาคารดังกล่าวที่มีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่นภายใต้แผ่นดินไหวเดียวกัน จากรูปจะได้ว่ามีลักษณะเดียวกับรูปที่ 7.8 คือที่แผ่นดินไหวขนาดแรง เส้นกราฟของอาคารที่ไม่มีและมีมวลหน่วงปรับค่าจะลู่เข้าหากัน นั่นก็คือประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการเปลี่ยนตำแหน่งมีค่าลดลง ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับรูปที่ 7.8

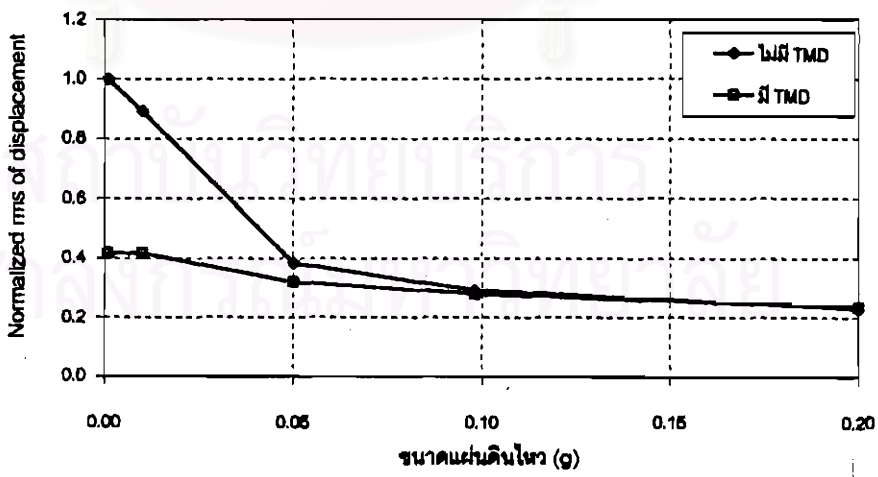


(ก) SCT-85

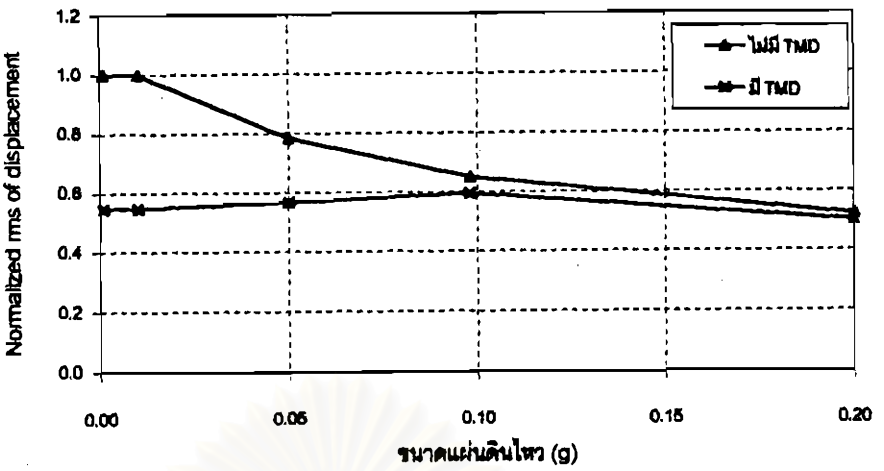


(ข) BYK-95

รูปที่ 7.8 อัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว



(ก) SCT-85

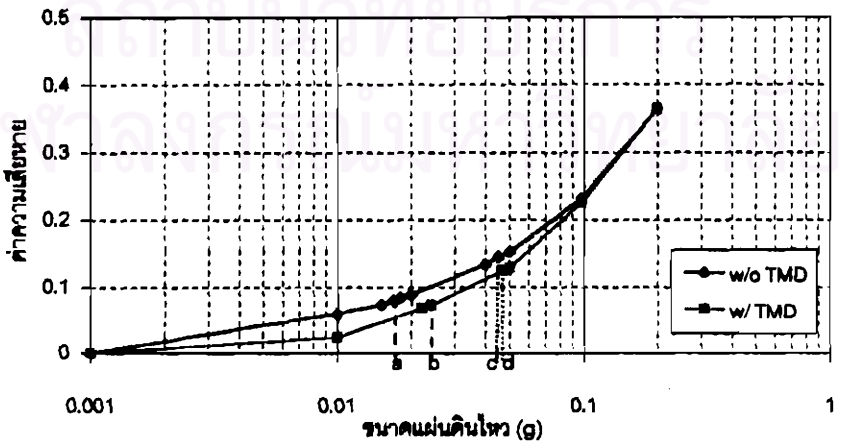


(ข) BYK-95

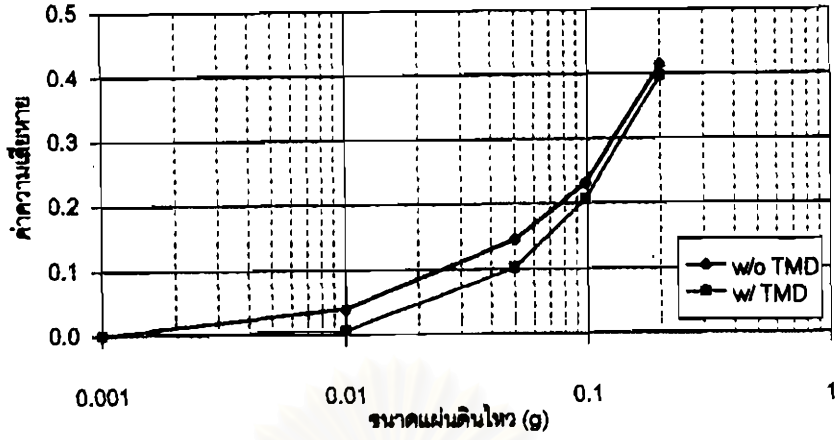
รูปที่ 7.9 อัตราส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของการเปลี่ยนตำแหน่ง (Root mean square of displacement) ของอาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหว

รูปที่ 7.10 แสดงค่าความเสียหายของอาคารตัวอย่างกรณีไม่มีและมีมวลหน่วงปรับค่า โดยที่อาคารตัวอย่างเริ่มมีความเสียหายเกิดขึ้นที่แผ่นดินไหวขนาด 0.01 และความเสียหายที่เกิดในอาคารตัวอย่างที่มีมวลหน่วงปรับค่า มีค่าน้อยกว่าอาคารตัวอย่างที่ไม่มีมวลหน่วงปรับค่าค่อนข้างมาก แต่อย่างไรก็ตามค่าความเสียหายระดับดังกล่าวไม่ถือว่าเป็นอันตรายต่ออาคารเลยเนื่องจากเป็นค่าที่น้อยมาก และที่แผ่นดินไหวขนาด 0.05 พบว่าสามารถลดความเสียหายได้ ถึงแม้จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณี 0.01 แต่ที่ความเสียหายระดับนี้เป็นค่าที่สูงกว่าและเมื่อพิจารณาที่รูปแบบความเสียหาย รูปที่ 6.7 ซึ่งเป็นกรณีมีมวลหน่วงปรับค่า กับรูปที่ 5.10 เป็นกรณีไม่มีมวลหน่วงปรับค่า พบว่าสามารถลดการครากที่เกิดขึ้นในคานได้มาก

ที่แผ่นดินไหวขนาดแรงขึ้น (0.098 และ 0.2) พบว่าในกรณี BYK-95 มวลหน่วงปรับค่ายังสามารถลดความเสียหายลงได้บ้าง แต่ก็เป็นค่าที่น้อย สำหรับ SCT-85 แทบไม่ช่วยลดความเสียหายเลย จากผลดังกล่าวจึงกล่าวได้ว่ามวลหน่วงปรับค่าไม่สามารถช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารในช่วงที่ความเสียหายมีค่ามากได้เลย



(ก) SCT-85



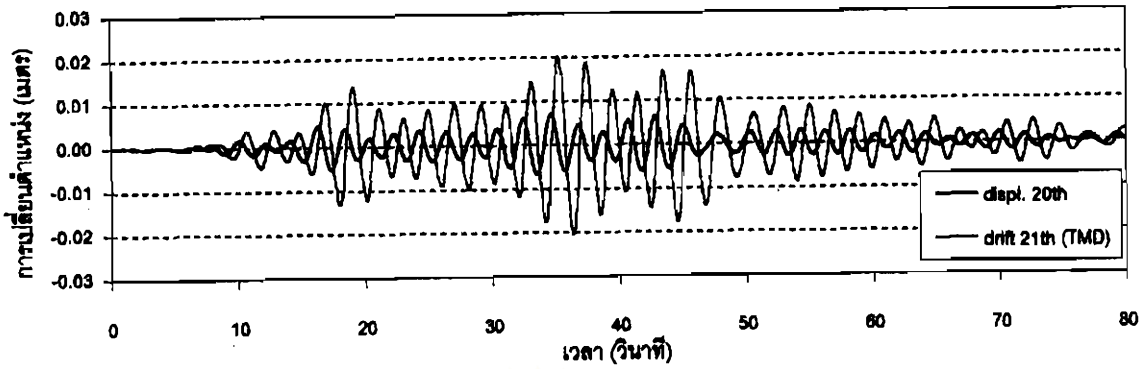
(ข) BYK-95

รูปที่ 7.10 ความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว

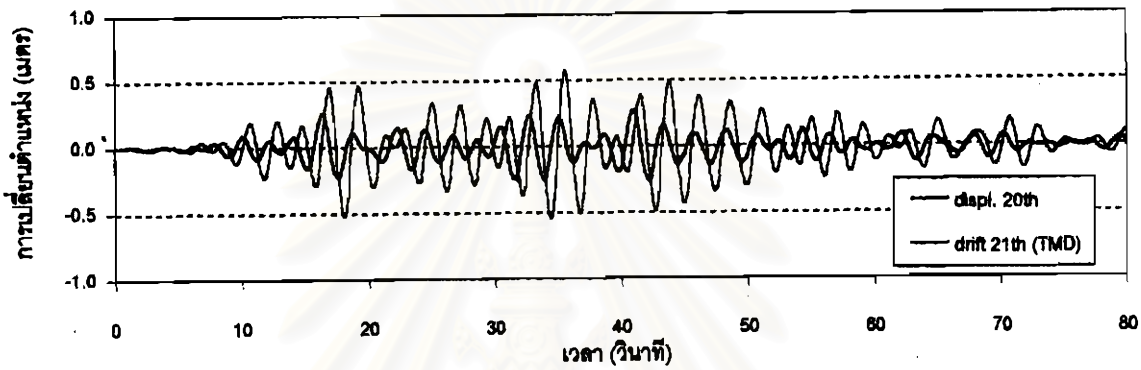
แต่อย่างไรก็ตาม พบว่ามวลหน่วงปรับค่าสามารถชะลอการรากที่เกิดขึ้นในคานได้ค่อนข้างดี ดังแสดงในรูปที่ 7.10(ก) ซึ่งเป็นความเสียหายที่แผ่นดินไหว SCT-85 ขนาดต่างๆกัน จากรูปที่จุด a เป็นการรากของคานที่เกิดขึ้นครั้งแรก ในกรณีอาคารตัวอย่างที่ไม่มีมวลหน่วงปรับค่าซึ่งได้ขนาดความเร่งแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.017 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก และเมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ากับอาคารตัวอย่างพบว่าการรากที่เกิดขึ้นในคานครั้งแรกเกิดที่แผ่นดินไหวขนาด 0.024 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก เห็นได้ว่าการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะช่วยชะลอความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งที่ลดลงนั้นเอง

สำหรับในกรณีการรากครั้งแรกในเสาพบว่ามวลหน่วงปรับค่าแทบไม่ได้ช่วยชะลอการรากดังกล่าวเลย กล่าวคือในอาคารตัวอย่างที่ไม่มีมวลหน่วงปรับค่า การรากในเสาเกิดครั้งแรกที่แผ่นดินไหวขนาด 0.045 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (จุด c) และในกรณีมีมวลหน่วงปรับค่าเกิดการรากในเสาครั้งแรกที่แผ่นดินไหวขนาด 0.047 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (จุด d) และจากรูปที่ 7.10 จะเห็นได้ว่าที่แผ่นดินไหวขนาดแรงขึ้น ค่าความเสียหายของกรณีไม่มีและมีมวลหน่วงปรับค่าจะเข้าใกล้กันมากยิ่งขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการเปลี่ยนตำแหน่งน้อยลง ทำให้ความเสียหายที่มีเพิ่มมากขึ้นด้วย

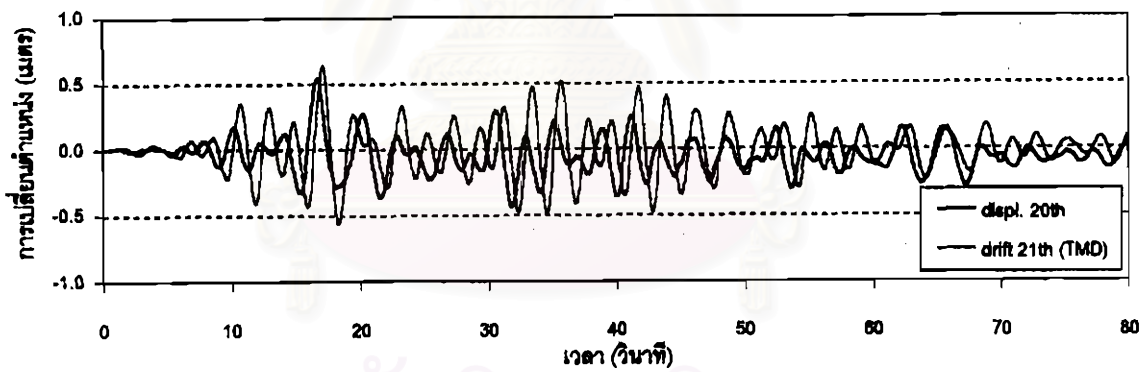
จากการศึกษาที่ผ่านมา มีการเสนอค่าความเร่งของแผ่นดินไหวสูงสุดที่มีโอกาสเกิดในประเทศไทย โดยคิดจากรอบของการเกิดแผ่นดินไหว 50 ปี มีค่าเท่ากับ 0.14 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ และนพดล ศุหาทัสนะดีกุล, 2536) จากงานวิจัยนี้หากแผ่นดินไหวขนาดดังกล่าวกระทำกับอาคารจะได้ความเสียหายของโครงสร้างมีค่าประมาณ 0.3 และเมื่อพิจารณาจากความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวขนาด 0.1 และ 0.2 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก จะได้ว่าที่ขนาด 0.14 นี้น่าจะมีการรากเกิดขึ้นในคาน, เสา และผนังแล้ว ความเสียหายที่เกิดขึ้นน่าจะค่อนข้างสูง นอกจากนั้นหากปรับปรุงอาคารดังกล่าวด้วยมวลหน่วงปรับค่าก็ไม่สามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งรวมทั้งความเสียหายที่เกิดขึ้นได้มากนัก



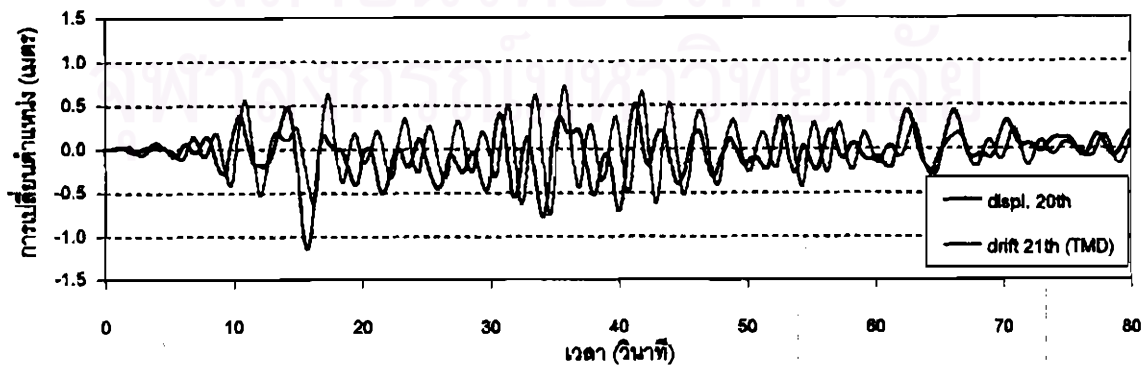
(ก) 0.001 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก



(ข) 0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก



(ค) 0.098 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก



(ง) 0.2 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

รูปที่ 7.11 การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 กับการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ของมวลหน่วงปรับค่าภายใต้ SCT-85

รูปที่ 7.11 แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งของชั้น 20 (displ. 20th) และการเปลี่ยนตำแหน่งของมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับชั้น 20 (drift 21st (TMD)) ภายใต้คลื่น SCT-85 ขนาด 0.001, 0.05, 0.098 และ 0.2 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกตามลำดับ พบว่าที่แผ่นดินไหวขนาดเล็กการเปลี่ยนตำแหน่งของมวลหน่วงปรับค่ามีค่ามากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 และมีเฟส (Phase) การเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนตำแหน่งของชั้น 20 ประมาณ 90° ทำให้มวลหน่วงปรับค่าช่วยลดการเปลี่ยนตำแหน่งได้มาก และที่แผ่นดินไหวขนาดแรงขึ้น (0.098 และ 0.2) พบว่าการเปลี่ยนตำแหน่งของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้าง และเฟสการเคลื่อนที่ไม่เป็น 90° ทำให้ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการเปลี่ยนตำแหน่งลดลง

นอกจากนั้นจากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่ามวลหน่วงปรับค่าต้องอาศัยเวลาในการปรับการเคลื่อนที่ให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างด้วย ดังนั้นหากโครงสร้างมีขนาดการเปลี่ยนตำแหน่งรวมถึงเฟสการเคลื่อนที่ที่ไม่คงที่ จะทำให้มวลหน่วงปรับค่าต้องปรับการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ประสิทธิภาพในการลดการเปลี่ยนตำแหน่งจึงไม่ดีนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย